

## “大科学装置前沿研究”重点专项 2023 年度项目申报指南

(仅国家科技管理信息系统注册用户登录可见)

为落实“十四五”期间国家科技创新的有关部署，国家重点研发计划启动实施“大科学装置前沿研究”重点专项。根据本重点专项“十四五”实施方案的安排，现发布 2023 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：开展专用型大科学装置的科学前沿研究，推动我国粒子物理、核物理、天文学等重要学科的部分研究方向进入世界先进行列；开展平台型大科学装置的先进实验技术和实验方法研究，提升大科学装置支撑科技创新、经济社会发展和国家安全的能力。继续支持我国具有特色和优势的大科学装置开展前沿探索研究，力争在世界上率先实现若干重大前沿与技术的突破。

2023 年度指南围绕粒子物理、核物理、强磁场与综合极端条件、天文学、先进光源与中子源及前沿探索、交叉科学与应用等 6 个方向进行部署，按照基础研究、共性关键技术两个层面，拟支持 51 个指南方向，拟安排国拨经费概算 5.71 亿元。其中，拟支持 13 个青年科学家项目，安排国拨经费概算 3900 万元，每个

300 万元。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。除特殊说明外，同一指南方向下，原则上只支持 1 项，仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同时，可同时支持 2 项，并建立动态调整机制，根据中期评估结果，再择优继续支持。

申报单位根据指南支持方向，面向解决重大科学问题和突破关键技术进行设计。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容。项目实施周期一般为 5 年。项目下设负责人 1 名，项目下设课题数不超过 4 个，每个课题设 1 名负责人，鼓励青年科学家担任课题负责人。每个项目参与单位总数不超过 6 家。

青年科学家项目支持青年科研人员承担国家科研任务，本指南方向 7 作为青年科学家项目组织申报。青年科学家项目参与单位总数不超过 3 家，不再下设课题。项目设 1 名项目负责人，青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1985 年 1 月 1 日以后出生（38 周岁以下）、女性应为 1983 年 1 月 1 日以后出生（40 周岁以下）。原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

本专项 2023 年度项目申报具体指南如下。

## 1. 粒子物理

### 1.1 ATLAS 上的 Higgs 物理和新物理寻找（基础研究）

研究内容：深入研究希格斯粒子的各产生模式与衰变道，确定它与各粒子间的耦合强度，精确测量它的质量、宽度等特性。探索尚未发现的双缪子、双粲夸克及  $Z\gamma$  稀有衰变道，寻找双希格

斯粒子产生过程并研究希格斯自耦合。精确测量 W 玻色子质量以及 W、Z 玻色子过程；研究多玻色子产生过程，特别是矢量玻色子散射过程，研究规范玻色子耦合和散射过程中的玻色子极化。寻找超对称粒子、暗物质粒子、希格斯粒子相关的超出标准模型新物理，以及长寿命粒子等。

考核指标：在希格斯粒子的性质测量中，若统计误差占主导，则测量精度比 Run-2 数据结果提高 30%；若系统误差占主导，则着重改进系统误差。希格斯粒子的双缪子衰变道信号显著度达到 3 倍标准偏差，并显著提高稀有衰变寻找的灵敏度及双希格斯产生截面测量精度。W 玻色子质量测量精度达 15MeV，测量 W、Z 过程精度好于 Run-2；测量双玻色子过程，完成对规范玻色子反常耦合以及双玻色子散射过程的极化测量。寻找超出标准模型新物理现象的实验灵敏度优于 Run-2 数据。

关键词：大型强子对撞机，Higgs 物理，电弱物理，标准模型精确检验，超越标准模型的新物理

## 1.2 CMS 上的 Higgs 物理和新物理寻找（基础研究）

研究内容：利用 CMS 实验数据研究希格斯粒子的特性，针对由多种产生机制和衰变末态构成的丰富多样的预期物理过程，测量希格斯粒子的质量、产生截面及其与基本粒子的耦合强度，并检验是否与标准模型相符；观测诸如稀有多玻色子产生的标准模型稀有过程，检验其产生截面是否与模型预言相符合；利用实验上种类繁多的末态，通过低质量多轻子末态来研究强相互作用

和强子物理，通过构造多粒子不变质量谱等形式寻找超出标准模型的新强子或新粒子。

考核指标：希格斯粒子与第二代费米子缪子的相互作用的预期探测灵敏度超过 3 倍标准偏差；结合单个和双希格斯粒子的产生和衰变过程，从反常耦合和有效场理论的观点研究耦合顶点，给出相关新物理参数的测量和约束，双希格斯粒子信号强度预期探测灵敏度在 95% 置信水平小于 3.7 倍标准模型预言；对一批稀有多玻色子等标准模型过程进行探测， $WZ\gamma$  预期探测灵敏度超过 3 倍标准偏差；利用 Run-3 数据，在  $J/\Psi+J/\Psi$ ， $J/\Psi+\Psi(2S)$  等末态寻找和验证 Run-2 观测到的各种超出。

关键词：大型强子对撞机，Higgs 物理，电弱物理，标准模型精确检验，超越标准模型的新物理

### 1.3 ATLAS 探测器升级（共性关键技术）

研究内容：按照与 ATLAS 合作协议规定，完成硅径迹探测器、缪子谱仪和高颗粒度时间探测器相关研发、制造和安装等工作。针对 LHC 高能量、高亮度的升级，改造 ATLAS 实验的粒子探测器系统，开展相关探测器研制、建造和运行，提升 ATLAS 实验对物理过程的灵敏度。主要包括：硅径迹探测器模块建造，径迹探测器系统集成和运行；缪子谱仪阻性板探测器及相关电子学的研制和运行；高颗粒度时间探测器研发和建造；新一代有时间信息的硅像素探测器的研发。

考核指标：硅微条径迹探测器空间分辨率达到 25 微米。阻

性板室探测器：计数率达  $1\text{kHz}/\text{cm}^2$ ，探测效率高于 95%，时间分辨率好于  $1\text{ns}$ 。高颗粒度时间探测器：研发硅传感器、前端电子学、探测器模块组装等，研制出高时间分辨率的探测器模块与前端读出电路板，其时间分辨率好于 50 皮秒。新一代有时间信息的硅像素探测器：研发时间分辨率在 100 皮秒以下的抗辐照传感器及前端电子学。

关键词：硅径迹探测器，缪子探测器，高颗粒度时间探测器，硅像素探测器

#### 1.4 利用粲强子衰变精确检验标准模型（基础研究）

研究内容：基于北京谱仪 III（BESIII）在  $2.0\sim 4.95\text{GeV}$  能量区间获取的海量数据，利用粲强子对阈值附近的量子关联特征，精确研究粲强子弱衰变过程，刻度格点量子色动力学的计算，检验标准模型夸克混合和重味强子衰变机制。主要包括：精确测量粲强子含轻子和多体强子末态衰变，获取 CKM 矩阵元及衰变常数和形状因子；精确测量中性粲介子衰变过程中的强相角差；开展粲强子和超子衰变性质理论和实验联合研究；寻找强子稀有衰变模式；研究重子对产生的阈值增强效应和电磁形状因子。

考核指标：系统研究粲强子含轻子衰变，精确测量 CKM 矩阵元  $|V_{cs}|$  和  $|V_{cd}|$ 、衰变常数，最好精度优于 1.5%，精确测量粲强子半轻衰变形状因子，最好精度小于 1.0%，检验轻子普适性；利用量子关联特性开展中性粲介子强子道衰变的强相角差测量，对 CKM 矩阵幺正三角形中  $\gamma$  角测量约束好于 0.5 度；开展粲强子衰

变到多体强子末态的实验研究；寻找粲偶素、粲强子和重子稀有衰变模式，分支比上限灵敏度达到  $10^{-5}$  至  $10^{-7}$ ；研究正负电子湮没中重子对阈值增强效应，精确测量重子的电磁形状因子。

关键词：强子物理，粲强子，CKM 矩阵元，标准模型精确检验，电磁形状因子

### 1.5 反应堆中微子物理研究（基础研究）

研究内容：利用江门中微子实验（JUNO）对反应堆中微子振荡进行精确测量。完成探测器运行调试，实现高质量物理取数；对反应堆中微子能区进行精确能量刻度；对比模拟和数据，深刻理解探测器能量分辨率；精确测量中微子混合角 $\theta_{12}$ 、质量平方差 $|\Delta m^2_{21}|$ 和 $|\Delta m^2_{31}|$ ，检验中微子混合的幺正性；基于反应堆中微子，研究三代中微子质量顺序问题。

考核指标：中微子混合角 $\theta_{12}$ 、质量平方差 $|\Delta m^2_{21}|$ 和 $|\Delta m^2_{31}|$ 测量精度好于 1%；三代中微子质量顺序的灵敏度超过 2 倍标准偏差。

关键词：中微子物理，中微子混合角，中微子质量，反应堆中微子

### 1.6 基于 PandaX-4T 的物理和关键技术研究（基础研究）

研究内容：基于 PandaX-4T 液氙探测器物理与刻度运行数据，深入研究暗物质和中微子的基本性质，并对下一代数十吨级液氙实验开展关键技术和方法的预先研究。主要包括：研究暗物质等物理信号的甄别及精确重建技术，以高灵敏度探测暗物质和太阳中微子；发展 MeV 能区、高位置重建性能的量能器的关键技术，

显著提升对无中微子双贝塔衰变的灵敏度；建立高颗粒度、高位置分辨率、低本底光子探测方法；开展面向下一代液氙实验的极低本底技术研究。

考核指标：对暗物质与核子自旋无关截面实现  $1\text{E-}47\text{cm}^2$  级的最强限制或灵敏度，以好于 3 倍标准差观测到硼 8 中微子； $2.5\text{MeV}$  处能量分辨率好于 1.5%， $^{136}\text{Xe}$  双贝塔衰变半衰期测量精度好于 3%；完成万道、 $1\sim 1000$  光电子/ $\text{cm}^2$  动态范围的光电探测阵列读出方案；低温容器材料铀钍质量占比均好于  $5\text{E-}12$ ，实现氦氙摩尔比好于  $1\text{E-}12$  和  $50\mu\text{Bq}$  级氦气的测量技术，氙本底好于  $5\mu\text{Bq}/\text{吨}$ 。

关键词：暗物质直接探测，中微子，液氙探测器

### 1.7 高能量加速器关键技术研究（共性关键技术）

研究内容：针对未来高能量正负电子对撞机高加速梯度的需求，开展正电子在等离子体尾场中的高效、高品质加速原理研究：通过调整束流相关参数，实现对加速效率、束流质量及容错度的全方位提升；研制基于铁基超导体的射频超导腔，获得关键性能参数。针对实验技术，研发无线数据传输和控制技术；研发 4D 晶体电磁量能器，实现优秀的能量、位置和时间分辨；研发低功耗、快读出和高定时精度的硅像素传感器芯片和大规模读出样机。

考核指标：设计等离子体尾场加速正电子方案，模拟能量转换效率 30%，能散不高于 5%，发射度增长不超过 50%；铁基超导腔频率  $4\sim 8\text{GHz}$ ，Q 值  $0.8\sim 2\times 10^6$ ；研制数据及控制无线传输系统，传输处理能力达  $30\text{Gbps}$ ；4D 电磁量能器样机 MIP 探测效率

95%，模拟 1~60GeV 电磁簇射能量分辨达  $3\sim 4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ ，线性度 1.5%，喷注能量分辨 3%~4%；硅像素顶点和高压 CMOS 径迹探测器样机的位置和定时精度、功耗分别达 3 和 10 $\mu\text{m}$ ，100 和 10ns，100 和 200mW/cm<sup>2</sup>。

关键词：等离子体尾场加速，超导腔，高速数据传输，电磁量能器，硅像素顶点探测器，硅径迹探测器

## 2. 核物理

### 2.1 弱束缚核反应的新现象与原子核的奇特结构研究（基础研究）

研究内容：依托放射性束流装置，产生远离稳定线的弱束缚原子核，利用储存环质谱术、在束和衰变谱学、核反应实验技术和方法，获取弱束缚奇特原子核结构和反应数据。实验与理论相结合，研究原子核壳层结构在远离稳定线核区的演化规律、近质子滴线原子核的奇异衰变性质、奇特的原子核集团结构和晕结构、弱束缚原子核参与的反应机制、核子关联、原子核中的同位旋对称性等，探索核内有效相互作用的新形势，发展和完善描述弱束缚核结构、性质、反应机制的理论。

考核指标：发展单原子核灵敏的储存环质谱术，精确测量 5~10 种短寿命原子核的质量，最高精度达到 10keV；发现 2~3 个奇特的原子核晕或集团结构；测量 2~3 个体系的多反应道数据，研究弱束缚核反应系统动力学；建立 2~3 个近质子滴线原子核的



衰变纲图，发现新的奇异衰变模式或完善实验数据；建立具体作用条件下原子核内有效相互作用新形式，发展和完善描述弱束缚核结构、性质、反应机制的理论。

关键词：原子核质量，奇特核结构，弱束缚核反应机制，滴线核的奇异衰变性质

## 2.2 重元素合成与性质研究（基础研究）

研究内容：依托国内强流重离子加速器，发展单原子核灵敏的测量技术和方法，研制新一代高分离效率充气反冲核分离器，开展超重核合成实验，冲击新元素 119 或 120 号的合成，力争实现新元素合成的重大突破；研制单原子灵敏的快速气相化学热色谱装置，研究超重元素气相化学性质，确定超重元素在周期表中的位置，检验元素化学性质周期律随原子序数增加的外推性；利用重离子束流诱发的熔合反应，合成铀元素附近缺中子新核素并建立其 $\alpha$ 衰变纲图，探索超铀元素缺中子同位素存在极限，研究原子核单粒子态和壳结构的演化。

考核指标：建成和完善新一代充气反冲核分离器，基于强流重离子束流开展超重元素的合成实验，对熔合蒸发产物的传输效率大于 40%；改进和优化单原子核灵敏的探测装置，对反冲核 $\alpha$ 衰变的探测效率大于 85%；建成用于超重元素气相化学研究的热色谱装置，并应用于在线实验研究；在缺中子超铀核区合成 3~5 种新核素，探索原子核存在的极限。

关键词：超重元素，新核素，超重元素化学性质，充气反冲

谱仪，反应机制，核结构

### 2.3 钍铀循环关键核数据测量（基础研究）

研究内容：依托白光中子源装置和熔盐实验堆，发展基于高分辨 TPC 探测器的裂变产物产额测量技术，发展质谱法和替代法中子俘获截面测量技术，获取钍铀循环关键核素的裂变截面、裂变产额和俘获截面数据，有效解决现有截面测量数据的分歧，结合锕系核裂变理论模型，研究裂变鞍点构型及其裂变机制。获取高温下钍基燃料四元盐热中子散射截面实验数据，并发展相关理论模型，研究共熔晶结构及温度变化对热中子散射的影响机理。基于熔盐实验堆开展宏观检验实验，研究复杂辐照环境下的钍铀转换和核素演化规律。为高精度钍铀循环关键核数据评价和工程应用提供重要的实验数据及理论依据。

考核指标：完善裂变反应测量平台， $^{232}\text{Th}$  的裂变产物核素（84A152）的测量数量 > 60 个，1MeV 附近裂变截面测量误差 < 15%，10MeV 附近裂变截面测量误差 < 5%；建立基于替代法的高精度中子俘获截面测量技术， $^{233}\text{Pa}$  中子俘获截面在热区的测量不确定度 < 5%，快区测量不确定度 < 20%；测量得到从室温到 800°C 条件下的氟锂铍钍燃料盐（7Li 富集度 > 99.95%）、氟钠铍钍燃料盐的热中子散射截面，温度点 > 10 个，建立钍基燃料盐的高精度热中子散射数据库；完成上述温度点下中子/伽马混合场的钍基燃料盐积分实验，基于熔盐实验堆完成 600°C 下钍基燃料盐核数据的宏观检验，有效解决钍铀循环核数据适用

性问题。

关键词：铀循环核素链，白光中子源，裂变机制，热中子散射机制，替代法测量，中子宏观实验

#### 2.4 原子核团簇和强子分子态物理（基础研究）

研究内容：发展核物理新型探测方法和分析技术，研究  $A < 30$  区放射性核素可能存在的多种集团结构，深入探索轻质量区放射性核的反应机制及奇特核结构。建立原子核团簇微观理论模型，寻找和研究  $N=Z$  稳定核以及丰中子核的类 Hoyle 态等奇特团簇结构和研究多中子关联。依托 BEPCII/BESIII 实验装置，开展对 X (3872) 等分子态候选粒子的产生衰变性质的实验研究，探索多夸克态形成机制。发展少体系统的理论方法，利用唯象模型和有效场论，结合格点量子色动力学 (LQCD) 的相关计算，研究多夸克结构和解释相关奇特强子态的实验数据。

考核指标：放射性核反应探测器阵列的几何效率提高到大于 60%，能量分辨好于 100keV；开展 3~5 个实验寻找轻核团簇结构。建立微观团簇模型描述共振态结构；在  $^{20}\text{Ne}$  等轻核中寻找类 Hoyle 态和奇特团簇结构。寻找新的重子激发态；寻找 X (3872) 等分子态候选粒子的新产生或衰变模式。建立少体模型研究 X (3872)、Zc (3900) 等奇特态强子结构；完成五夸克体系的计算及预言。

关键词：原子核团簇结构，奇特强子态，量子少体系统、核或光核实验

## 2.5 先进离子加速器的关键技术研究（共性关键技术）

研究内容：针对高功率、高能量、高性能离子束流制备和操控方法，开展先进离子加速器动力学机制和关键技术研究。发展高功率离子直线加速器中的束流实时操控技术和束流快速恢复技术，研究高性能复合材料在新一代射频超导加速腔中的应用。研究高功率超短脉冲离子束团相空间精准操控的动力学问题与关键技术，研制储存环及束线中超短离子束团快速偏转和位置扫描的关键设备。探索研究面向电子离子对撞机的高极化度离子束产生、传输，先进质子极化度测量，以及探测器系统核心技术。

考核指标：超导直线加速器  $20\text{p}\mu\text{A}$  离子束流连续波运行实现 10 秒内的快速恢复；复合材料射频超导腔体表面峰值电场大于  $40\text{MV/m}$ ， $Q$  值大于  $1\text{E}10$ 。开发离子束流动力学模拟平台；研制超短离子束团偏转的大功率快速踢轨磁铁电源，输出电流大于  $3000\text{A}$ ，上升时间小于 100 纳秒。研制极化质子束极化率测量装置，测量不确定度小于 5%。

关键词：强流离子束，超短束团操控，极化质子，束流快速恢复，复合超导腔，小角度粒子探测

## 2.6 基于高能强流电子束的核物理实验相关探测技术研究（共性关键技术）

研究内容：基于国内短脉冲强流、数 GeV 高能电子束，进行利用逆康普顿散射技术产生数 GeV 级准单能、高极化、强流伽马束的关键技术预研；基于此类强流电子束，发展和研制 GeV 级伽

马光核物理反应产物的探测和鉴别技术；开展数 GeV 高能电子散射实验与强子谱学测量实验装置的预研；利用 8GeV 高能电子束流打靶试验探测暗物质可行性研究。

考核指标：电子束与激光束时间同步精度  $\leq 100\text{ps}$ ，位置同步精度  $\leq 10\mu\text{m}$ ，激光谐振腔功率相对无谐振腔功率提升  $\geq 10$  倍；完成用于基于上述伽马束的光核反应产物探测器系统原理样机的研发，包括时间投影室和电磁量能器，其中时间投影室位置分辨好于  $2\text{mm}$ ；研制高密、高速、高精度径迹探测器 (MAPS+LGAD+MPGD)、契伦科夫探测器与量能器系统，以及配套数据采集系统的 1/12 原理样机，其中切伦科夫探测器实现  $2.5\sim 7\text{GeV}$  的  $\pi/K$  强子种类分辨好于  $3\sigma$ ；完成利用 8GeV 高能电子探测暗光子实验设计报告，完成用于暗光子探测的晶体电磁量能器模块研制，能量分辨小于  $5\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ ，缪子排除率大于 99.9%。

关键词：高能伽马束，逆康普顿散射，加速器暗物质实验，数 GeV 强流电子束

## 2.7 强流丰中子束产生及离子束协同辐照效应研究(基础研究)

研究内容：依托 BRIF 装置和串列加速器平台，开展强流丰中子束产生技术研究，包括快速释放靶、高效电离、靶-离子源耦合等技术，产生超过  $1\text{E}10\text{pps}$  的丰中子核束；提升 BRIF 产生放射性核束的能力，并为下一代放射性核束装置奠定技术基础；开展离子束协同辐照效应问题研究，包括质子重离子协同、能量低至  $100\text{eV}$  的低能离子束与  $\text{MeV}$  离子束协同的辐照技术，创新

研究方法，发展多技术联用、多维度检测、多尺度表征等手段，提升现有装置的科学研究水平。

考核指标：掌握裂变碎片丰中子核束产生技术，产生短寿命核束 5 种以上，最高束流强度不低于  $1E10pps$ ；MeV 离子束最小束斑尺寸不大于  $2\mu m$ ，可同时开展多尺度 ( $\mu m\sim cm$ )、多维度 (2D/3D)、多种分析技术联用的在线检测和外束辐照；低能离子束能量范围为  $100\sim 1000eV$ ， $D^+$  离子束流引出密度大于  $1E20m^{-2}s^{-1}$ ，实现同时的低能和 MeV 能量离子协同辐照及原位离子束分析测量，D 在 W 靶中的分析深度大于  $5\mu m$ 。

关键词：丰中子束流，协同辐照效应，铀靶

## 2.8 CDEX 高纯锗暗物质直接探测实验（基础研究）

研究内容：依托深地实验平台，开展 50kg 量级高纯锗阵列建设和运行；建立高纯锗阵列高效刻度方法和实验数据分析方法；基于高纯锗阵列系统的实验数据，开展弱相互作用大质量粒子（WIMP）暗物质、轴子暗物质和暗光子暗物质等不同暗物质候选者的实验探测；对于暗物质粒子探测灵敏度进入  $10^{-44}cm^2$  区间，给出国际前沿研究成果；对下一代吨量级高纯锗暗物质实验的关键探测技术和方法开展预先研究，建立吨量级高纯锗探测器系统低本底和阵列化关键技术细化方案。

考核指标：建立液氮低温低本底实验环境，水含量小于 10ppb、氧含量小于 10ppb、氦含量小于  $0.1mBq/m^3$ ；建立总质量约 50kg 的高纯锗探测器阵列系统；能量分辨率达到：10keV 能区

0.3keV、1.3keV 能区 0.15keV; 2~4keV 能区本底水平小于每天每公斤 0.1 个事例; 实验系统数据量达到 15000 公斤·天; 建立高纯锗阵列系统刻度方法和实验数据分析方法; 对于暗物质粒子探测灵敏度进入  $10^{-44}\text{cm}^2$  区间, 建立吨量级高纯锗探测器系统低本底和阵列化关键技术方案。

关键词: 高纯锗探测器, 高纯锗阵列, 暗物质直接探测, 探测器刻度

## 2.9 新型辐射和粒子探测技术和相关电子学研究 (共性关键技术)

研究内容: 研究建造大面积、高分辨微结构气体探测器的关键技术和新材料, 探索固体物理、材料科学、化学等领域的材料和工艺在气体探测器中的应用。开展超快位敏微通道板光电倍增管的理论分析和设计研究, 研究各组件及整管的制作工艺。开展深冷低温量热器技术和光热两维读出方法的研究。研究高速、高精度的核电子学技术, 包括: 极低噪声的前端读出电子学、极高精度时间测量和高速高精度波形数字化等关键技术, 开展高辐照本底环境下的抗辐照研究。

考核指标: 制作出能在强辐照环境下工作的微结构气体探测器原型, 有效面积达到  $100\text{cm}\times 50\text{cm}$ , 在  $1\text{MHz}/\text{cm}^2$  的高辐照计数率水平下, 探测效率好于 95%, 位置分辨好于  $200\mu\text{m}$ 。研制出超快位敏微通道板光电倍增管样管, 光阴极有效尺寸  $\geq 2\text{cm}\times 2\text{cm}$ , 峰值量子效率  $\geq 20\%$ , 增益  $\geq 1\times 10^6$ , 渡越时间涨落  $\leq$

50ps，阳极个数 $\geq 4\times 4$ ，阳极间距 $\leq 5\text{mm}$ 。分别研制出电荷测量、时间测量和波形数字化电路，时间测量精度好于 10ps，电荷测量精度达到 0.5fC，采样率达到 20Gsp/s。研制出具有光热两维读出能力的低温量热器原型，能量分辨达到 20keV@2615keV，电子反冲型和核反冲型信号的区分能力达到  $5\sigma$ 。

关键词：微结构气体探测器，微通道板光电倍增管，深冷低温量热器，低噪声的前端读出电子学，高精度时间测量，高速高精度波形数字化，抗辐照电子学

### 3. 强磁场与综合极端条件

#### 3.1 面向大科学装置极端服役高性能超导强磁体关键技术研究（共性关键技术）

研究内容：依托综合极端条件、强磁场和 CRAFT 聚变堆主机关键设施等大科学装置，开展极端服役工况下高性能超导强磁体跨尺度非线性多场耦合机理、磁场质量调控方法和临界电流退化规律等方面研究，发展大型高场磁体构造和高性能运行关键技术，面向综合极端条件等实验装置，突破 40T 级高性能超导强磁体先进设计制造技术，实现极端服役环境极高性能超导强磁体的安全运行。

考核指标：建立 40T 级超导强磁体的跨尺度非线性多场耦合设计理论与方法，发展服役性能测试方法，完善评估体系，形成设计软件；依托实验方法和理论模型，研发新型导体，掌握超导与结构材料的性能及其关键影响因素，构建评估体系与数据库；



研制极高场高温内插超导磁体，实现对屏蔽电流的抑制，磁场均匀度优于  $5 \times 10^{-4}$ ，稳定度优于 0.8ppm/h，高温超导接头电阻达到  $10^{-10} \Omega$  量级，超导导体承载电磁力  $\geq 600 \text{MPa}$ 。

关键词：综合极端条件，极限服役工况，电机机械效应，极高场线圈制造，屏蔽电流

### 3.2 综合极端条件下半金属和低维电子体系的新奇量子物态与多维度调控（基础研究）

研究内容：依托综合极端条件实验装置，针对半金属和低维电子体系中的新奇量子物态和潜在器件应用等前沿科学问题，利用强磁场、超高压、极低温等极端条件拓展物质的相空间，制备新材料和异质结并探索其新奇量子物态；研究综合极端条件下量子物态的多维度调控和演变规律，构建量子物态相图；综合利用先进谱学技术揭示量子物态的微观机理，构筑面向应用的原型器件。

考核指标：获得 3 种或以上具有新奇量子物态的半金属、低维电子材料或异质结；实现 3 种或以上材料中量子物态的多维度调控，构建强磁场（ $> 25 \text{T}$ ）、高压（ $> 200 \text{GPa}$  对顶砧超高压、 $15 \text{GPa}$  多砧静水压）、极低温（ $< 30 \text{mK}$ ）等极端条件下的量子物态相图；制备 3 种或以上面向应用的原型器件，包括高性能氧化物界面功能器件、基于低维超导体系的量子器件，阐明其工作原理。

关键词：综合极端条件，半金属和低维电子材料，新奇量子

物态，多维度调控

### 3.3 生物糖脂代谢的稳态强磁场检测新技术研究（共性关键技术）

研究内容：依托稳态强磁场大科学装置，瞄准生物糖脂相互作用机制，发展高灵敏度高分辨率磁共振波谱与定量成像新技术；阐明机体糖脂代谢信号转导过程中关键蛋白的调控作用；揭示正常与异常机体糖脂代谢变化规律。

考核指标：发展核磁共振定域波谱脉冲序列研究糖脂代谢过程，实现 20.0T 超高磁场下离体生物组织磁共振纯化学位移定域谱中 $\alpha$ -葡萄糖特征峰分辨率  $< 8.0\text{Hz}$ ，同时 $\alpha$ -葡萄糖特征峰的单自旋态滤波信号转化率达到 55%；建立多参数定量成像新技术，实现 7.0T 以上单次扫描 150ms 的高时间分辨定量成像以及 5s 内完成的高空间分辨单层扫描，并获得 5 种以上定量信息；阐明机体糖脂代谢过程中 3~5 种关键蛋白的调控作用，实时跟踪糖脂代谢过程中重要代谢产物变化，探索糖脂代谢与氧化还原和铁代谢等过程的关系；基于稳态强磁场和高强度的梯度磁场来揭示正常与异常糖脂代谢变化规律。

关键词：糖脂代谢，核磁共振波谱，核磁共振成像，稳态强磁场

### 3.4 超高强度磁场及高重频磁场关键技术研究（共性关键技术）

研究内容：依托强磁场装置，开展面向磁学、光学、中子及 X 射线等实验研究的数百特斯拉单匝线圈磁场以及高重频磁场的

关键技术研究，研发高性能导体材料和高强度高模量陶瓷纤维加固材料，建立单匝线圈高速动态变形模型，探索磁场强度与线圈几何结构、材质之间的关系，突破高重频磁场系统、高功率脉冲电源及磁体电磁、热学设计难题，完成单匝线圈与高重频磁场系统样机研制，并开展科学实验研究。

考核指标：开发拉伸强度 1GPa、断裂应变大于 3%、室温电导率高于 65%IACS 的大截面导体线材；制备拉伸强度高于 2GPa，弹性模量高于 200GPa 的陶瓷纤维；单匝线圈磁场大于 200T；重频磁场场强大于 25T、重复频率高于 10Hz、连续重复运行时间大于 30min。

关键词：强磁场，重频磁场，单匝线圈，高强高导线材，陶瓷纤维

### 3.5 强磁场大科学装置下自旋的时间空间高分辨表征技术研究（共性关键技术）

研究内容：聚焦前沿电子材料与生物化学过程中单自旋和自旋过程磁控关联的研究需要，在高场水冷磁体与大口径多通孔超导劈裂磁体中，发展磁场、温度、光场激发下的电子自旋与核自旋的高分辨表征技术，强磁场下材料合成的原位光谱表征技术；研发具有原子级空间分辨的高场自旋成像测试系统、具有时间分辨的电子自旋共振/核磁共振测试系统、具有能谱分辨的强磁场材料合成原位光谱测试系统，为探索关键量子物性和生物化学过程的起源机制与应用提供平台基础。

考核指标：建成兼容水冷磁体、18K 低温的原子级自旋分辨 STM；建成兼容水冷磁体的 ESR，室温下 220GHz ( $\pm 10$ GHz) 的时间分辨优于 2ms；建成高场光—射频脉冲同步的液体 NMR，射频和光脉冲调制误差  $< 1$ ms，时间分辨好于 1s；建成 10T 劈裂磁体、最大场梯度为  $1000\text{T}^2/\text{m}$ 、双室温通道直径为 100mm；建成与劈裂磁体适配的材料合成与原位光谱测试系统，波谱范围 400~1100nm，光谱分辨率  $< 5$ nm。

关键词：原子分辨自旋测量，水冷高场磁体，时间分辨电子自旋共振，时间分辨核自旋共振、劈裂超导磁体，材料合成原位光谱

## 4. 天文学

### 4.1 基于大规模星系巡天的宇宙学研究（基础研究）

研究内容：基于 DESI 等光谱和测光巡天：构建大规模星系群样本，实现对宇宙物质密度分布和结构演化的精确测量；开展大规模弱引力透镜剪切信号测量，获得宇宙大尺度结构的系列交叉相关精确测量；基于大规模 N 体及流体动力学数值模拟，构建宇宙大尺度结构分析的完整管线 (pipeline)，对 DESI 观测开展宇宙学仿真器研究；综合多种宇宙学精确测量结果，结合仿真器手段，开展暗物质冷温属性、暗能量动力学性质检验、中微子质量测量等宇宙学前沿研究。

考核指标：基于 DESI 超过 2000 万、覆盖从矮星系到大质量星系的光谱样本，完成  $z < 0.5$  包含 5 万以上星系团的完备星系群

样本构建及暗物质密度场重构；测量 8 亿以上弱引力透镜星系形状，完成系列弱引力透镜等交叉相关精确测量；完成不低于 2 千亿粒子的暗物质模拟及 1 千亿粒子的流体模拟；构建包含模拟星系产生、选择效应刻画、误差分析、优化统计等在内的完整大尺度结构分析 pipeline；应用于 DESI 观测和中国空间站工程巡天望远镜（CSST）巡天研究；限制暗能量本质因数从 1 提升到 3，中微子质量上限达到 0.06eV。

关键词：暗物质冷温性质，暗能量动力学性质，宇宙大尺度结构，引力透镜，星系巡天，数值模拟

#### 4.2 不同级别黑洞的大样本研究（基础研究）

研究内容：依托国内先进的光学、射电和高能等天文重大科技基础设施，充分结合这些设施在时变和光谱方面的独特优势，并利用国内外多波段、多信使数据开展恒星级黑洞和超大质量黑洞的大样本研究。搜寻恒星级黑洞候选体，开展后随观测及动力学质量测量，扩大样本并构建恒星级黑洞质量分布。探索超大质量黑洞周围吸积盘特殊环境下的恒星级黑洞的吸积和辐射特征。对照恒星级黑洞研究超大质量黑洞的吸积和变化。观测活动星系核和宿主星系的多波段性质，并结合数值模拟，研究黑洞与星系共同演化的物理机制。

考核指标：基于国内天文重大科技基础设施的多波段协同观测，搜寻得到不少于 50 个新的黑洞候选体。通过后随观测限制不少于 10 个恒星级黑洞候选体的质量范围，进一步完善恒星级

黑洞质量分布。建立特殊环境下黑洞吸积模型，得到辐射特征。揭示超大质量黑洞（涵盖多种吸积状态、覆盖  $10^5\sim 10^9$  太阳质量范围）与恒星级黑洞吸积的异同。发现黑洞与宿主星系共同演化的重要新线索。

关键词：恒星级黑洞，超大质量黑洞，吸积盘，光谱双星，活动星系核

### 4.3 银河系气体分布与结构研究（基础研究）

研究内容：基于银河画卷及其拓展巡天、FAST 中性氢观测和多波段资料，系统研究银河系内大尺度气体分布和物理化学性质；研究分子云内部结构、年轻星外流内落信号、云核的性质及其中的恒星形成，统计恒星形成的规模和效率；分析太阳系近邻结构体及银盘、旋臂的多维结构和运动；借助多相气体信息，研究跨尺度星际介质组份和反馈作用，包括能量注入、作用范围以及物质循环过程，研究从原子云到分子云的演化以及银道面附近延展伽马射线与气体的相关性。

考核指标：完成近 1000 平方度的 CO 气体巡天，建立北银道面正负 5 度区域气体样本，获得气体分布与性质的统计结果。完成约 1000 个区域（ $\sim 20$  平方度） $\text{NH}_3$  致密气体观测，建立包含 5000 个以上目标的致密云核样本，依据动力学信号获得恒星形成率探测结果。给出太阳系 3kpc 内主要结构体以及北天银河系第 I、II、III 象限主要气体旋臂的定量建模。构建出银道面 pc 到 kpc 尺度多相物质分布和相互作用的一组新模型，初步揭示从原子云到分

子云的演化，建立约 200 个 SNR-分子云复合体样本。

关键词：分子气体巡天，星际气体，银河系气体结构，恒星形成，恒星反馈

#### 4.4 基于 2.5 米大视场巡天望远镜的前沿科学研究（基础研究）

研究内容：利用 2.5 米大视场巡天望远镜，开展北天最高灵敏度的大天区、多层次、高时频时域巡天。开发软件工具包，快速高效处理分析观测数据，为巡天发现和原创研究提供数据和基础性支撑。系统发现并监测动态宇宙中的活动星系核、潮汐撕裂事件和超新星等，研究其统计性质和机制。开展太阳系天体普查监测，实现外太阳系新天体发现突破。开展银河系和本星系群结构和卫星星系搜寻研究，建立近邻宇宙矮星系特色样本，研究小尺度星系形成和演化机制。

考核指标：成功实施巡天观测，获取大于 2.5PB 时域观测数据和科学数据。获得两万个以上时变天体光变曲线，发现超过五十例潮汐撕裂事件，显著提升样本统计性质，获取大样本活动星系核（AGN）多波段时延，深化黑洞吸积物理理解；发现五千颗以上超新星和快速演化光学暂现源等爆发事件，揭示恒星级时域天文事件起源；搜寻监测十万颗以上太阳系天体；获得北天球十亿颗以上天体位置和亮度源表，建立近邻矮星系大样本，发现十个以上星系子结构和卫星星系，提供小尺度星系形成演化观测约束。

关键词：大视场巡天，潮汐撕裂事件，超新星，近场宇宙学，

极端条件物理规律

#### **4.5 先进大型亚毫米波望远镜关键技术研究(共性关键技术)**

研究内容：面向先进大型亚毫米波望远镜研制需求，突破相关关键技术，包括：亚毫米波天文台址测量与数据分析，大口径高精度天线设计与制造技术研究，多波束外差混频接收机和大规模阵列探测器特性表征及系统技术研究，对应先进科学目标的望远镜总体技术方案论证等。

考核指标：不少于 2 个亚毫米波天文台址的实测及卫星数据分析报告；面形精度达 30 微米 (rms)、口径不小于 15 米的天线设计方案及单块原型面板；外差混频接收机波束数  $\geq 64$ ，混频器噪声温度达 5 倍量子噪声；超导探测器成像阵列总像元数不少于 10k；频率覆盖 100~492GHz 的 15 米口径亚毫米波天文望远镜总体技术方案。

关键词：亚毫米波望远镜，亚毫米波台址测量，高精度天线，超导接收机

#### **4.6 未来时域巡天望远镜阵关键核心技术研究(共性关键技术)**

研究内容：面向未来时域巡天望远镜阵，研发无人值守全自动运行分布式天文台运控系统，搭建跨台站、数量可扩展的望远镜阵的无人值守运控平台；突破时域天文快速响应技术，实现十分钟量级快速触发和后随观测响应；研究 CMOS 芯片高精度拼接及相关真空、制冷和电子学技术，完成拼接相机研制；探索基于 CMOS 相机数据处理算法，完成标准化 CMOS 时域数据处理软



件，研究海量数据存储与管理的关键技术。

考核指标：研发完成望远镜阵分布式操作系统软件，实现跨台站、数量可扩展至百台量级的望远镜阵的无人值守全自动运行；突破时域天文快速响应技术，实现光谱后随观测响应时间优于 10 分钟；拼接相机成像尺寸  $\geq 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ，拼接焦面平面度  $p-v \leq 50\mu\text{m}$ ，制冷温度优于  $-50^\circ\text{C}$ ，杜瓦真空度  $\leq 5\text{E-}3\text{Pa}$ ，读出噪声  $\leq 6\text{e-}$ ，读出速度优于 3sec；完成搭建标准化时域数据处理软件，以及 500PB 量级数据存储与管理所需的软件。

关键词：时域天文，望远镜阵，智能调度，全自动望远镜，大数据处理，大靶面相机

#### **4.7 VLBI 高精度天体测量和关键技术研究（共性关键技术）**

研究内容：组建我国射电望远镜为主的甚长基线干涉测量（VLBI）网，对毫秒脉冲星进行高精度天体测量，测定毫秒脉冲星的视差和自行，实现运动学和动力学天球参考架的精确连接，提升纳赫兹引力波探测灵敏度；通过对射电多星系统的高精度天体测量，测定其轨道运动，结合盖亚卫星（Gaia）数据研究光学和射电位置差异的物理因素；对引力波电磁对应体、快速射电暴及其对应持续源等天体进行 VLBI 高精度天体测量，精准定位其辐射来源，为研究该类天体辐射机制提供重要观测约束；以大质量恒星形成区脉泽作为探针，结合 Gaia 恒星天体测量数据研究银河系结构和运动学；通过研制 K/Q/W 宽带多频段同时观测系统，结合国内外 VLBI 网，实现星周 OH/H<sub>2</sub>O/SiO 脉泽的精确位置测

定，研究演化晚期恒星的质量损失过程。

考核指标：完成 15 颗左右脉冲星的视差和自行，实现运动学和动力学天球参考架的精确连接；15 颗左右脉泽的三维位置和运动，进一步研究银河系结构和运动学；获得 5 颗左右连续谱变源或射电星辐射来源的高精度位置测定，从而准确判定其对应的天体，理解变源辐射机制；视差精度和位置精度好于 0.1mas。

关键词：甚长基线干涉测量，脉泽，脉冲星视差，射电星，银河系旋臂结构

#### 4.8 先进地基太阳望远镜关键技术研究（共性关键技术）

研究内容：面向先进大型地基太阳望远镜研制需求，突破相关关键技术，包括：利用一米新真空太阳望远镜（NVST）等太阳高分辨观测平台探索确定大型先进地基太阳望远镜对小尺度磁场起源及其演化、微小尺度磁重联、活动触发事件等科学现象的物理参数及其观测方法；大口径环形望远镜光机设计与像质主动保持技术；大型先进地基太阳望远镜热致湍流控制技术；光学系统偏振中性设计与高精度偏振定标技术；弱偏振信号的高分辨率、高精度检出技术；近红外科学级探测阵列关键技术及国产化。

考核指标：获取 1PB 的高分辨率观测数据，从中筛选出不少于 10 个典型小尺度磁重联和 10 个爆发活动事件进行分析研究；完成 8 米口径太阳望远镜光机系统和热控系统设计；验证并确保大型先进地基太阳望远镜对太阳成像的空间分辨率可达 0.03 角秒；

验证并确保偏振测量精度可达到  $10^{-4}$  量级；发展新的太阳磁场高分辨率观测技术，与传统高分辨率统计重建技术相比，弱偏振信号信噪比提升 2 倍以上；自主研发科学级近红外阵列，分辨率不小于  $1K \times 1K$ ，暗电流小于  $300e/s/pixel$ 。

关键词：大口径太阳望远镜，太阳微小尺度磁场，太阳活动触发机制，环形孔径，高分辨率太阳观测，高精度偏振测量

## 5. 先进光源、中子源及前沿探索

### 5.1 高能量密度复杂流场的高灵敏高分辨诊断技术研究（基础研究）

研究内容：针对辐射流体力学不稳定性增长与湍流混合等高能量密度物理中的复杂流场演化过程，研制高精度多时空尺度磁流体力学程序，发展高空间分辨 X 射线成像诊断、高灵敏度 X 射线能谱平焦场诊断、多分幅空间成像的深紫外汤姆逊散射诊断，建立百 Mbar 驱动压力下流体不稳定性增长微结构高分辨成像、湍流混合区密度精密测量和辐射源等离子体状态表征等精密诊断方法，开展诊断新方法与新技术在收缩几何流体不稳定性增长等高能量密度物理实验的应用演示。

考核指标：建立高精度多时空尺度辐射磁流体力学程序，在超级计算机上实现万核并行计算及考核。发展中高能区 X 射线 ( $\geq 8keV$ ) 高空间分辨成像技术，空间分辨优于  $3\mu m$ 。发展高灵敏度和时间分辨的 X 射线能谱平焦场诊断技术，灵敏度相比平面晶体谱仪提升 50 倍，时间分辨好于  $20ps$ 。发展空间成像深紫外汤姆

逊散射诊断技术，幅数不少于 4 幅，单幅曝光时间短于 250ps。完成百 Mbar 驱动压力下流体不稳定性与湍流混合的综合实验，实现诊断技术应用。

关键词：辐射流体力学不稳定性，X 射线成像，X 射线能谱平焦场诊断，深紫外汤姆逊散射诊断

## 5.2 新型超强光场的创建与表征原理和技术研究(基础研究)

研究内容：针对以二十世纪的啁啾脉冲放大（CPA）为代表的强激光物理原理与技术难以适应追求更强激光和更多科学应用的现状，探索未来强激光新路径并创建关键技术。重点研究同时具有逼近极限放大效率和带宽的强激光新路径，创建面向单束百拍瓦和一千赫兹重复率拍瓦的极端超强激光技术体系；研究位相不敏感型飞秒涡旋高增益放大的新原理新技术，创建中红外波段和高质量涡旋的新型光场操控技术；研究有效提升强激光光束质量和紧聚焦能力的关键技术，创建在线直接测量聚焦光强等强激光关键参数的能力；研究大口径超宽带强激光脉冲的超高信噪比提升技术以及时空耦合畸变抑制技术，创建超高时空信噪比和超高时空脉冲质量的在线诊断能力。

考核指标：建立未来强激光放大的技术体系，泵浦转换效率  $\geq 80\%$ ，波长相对带宽  $\geq 25\%$ ，高效率一千赫兹重复率放大时抗热效应位相失配量  $\geq 2$ ，补偿一千赫兹重复率放大器的热致波前畸变至  $\leq \lambda/2$ ；中红外涡旋放大增益  $\geq 10^9$ ，波长 2~5 $\mu\text{m}$ ，涡旋奇点噪声  $\leq -40\text{dB}$ ，环上光强波动  $\leq 3\text{dB}$ ；开发强激光的紧聚焦、超高

时空质量以及在线诊断技术，焦斑 $\leq 3$ 倍波长，聚焦光强测量精度优于 3dB；焦斑脉冲信噪比 $\geq 1013$ ，时空斯特列尔比 $\geq 0.8$ 。

关键词：超强激光，涡旋光场，光场操控

### 5.3 高精度 X 射线纳米聚焦镜研制技术（共性关键技术）

研究内容：针对先进同步辐射与 X 射线自由电子激光装置建设中的 X 射线纳米聚焦镜关键元件，研究 X 射线聚焦镜全频谱纳米形貌的精密修正和超光滑抛光机理，发展纳米-百纳弧度级形貌精度的聚焦镜复合加工技术以及高分辨聚焦镜梯度多层膜镀制技术，建立高陡度非球面二维形貌的高精度离线/在线检测方法，发展聚焦镜纳弧度级高稳定性集成和自适应调控技术，基于同步辐射站开展 X 射线聚焦性能测试验证。

考核指标：完成 X 射线聚焦镜元件的自主研制，有效长度在 50~250mm 之间，有效宽度 $\geq 10$ mm，面形高度误差（去最优二阶轮廓后） $< 3$ nm（RMS），子午方向斜率误差 $< 0.2\mu\text{rad}$ （RMS），高频粗糙度 $< 0.3$ nm（RMS），梯度多层膜在 10keV 反射率 $> 60\%$ ，二维面形测量重复性误差 $< 1$ nm（RMS），聚焦镜轮廓主动调控精度 $\leq 1$ nm（RMS），一维聚焦光斑尺寸（半高宽） $\leq 100$ nm。

关键词：先进光源光学元件，纳米聚焦镜，检测方法

### 5.4 多元高纯锗同步辐射能谱探测器及读出电子学研究（共性关键技术）

研究内容：针对大科学设施同步辐射谱学技术发展和用户对高性能高纯锗探测器及高速电子学读出系统的需求，突破高分辨

多元阵列高纯锗 X/伽马射线能谱探测器及其读出电子学系统关键技术，解决多元阵列传感器国产化制作及封装工艺、多单元和低噪声前置放大器的设计和研制、高速多通道脉冲波形数字化和堆积处理及算法、多元探测器同步辐射光源能量刻度、效率和计数率标定。开发具有自主知识产权的高分辨多元高纯锗能谱探测器及其读出电子学系统，开发相关软件和数据库。

考核指标：X 射线能谱探测器能量分辨达到  $180\text{eV}@5.9\text{keV}$  ( $<1\text{kcps}$ )，探测能量范围  $5\sim100\text{keV}$ ；单元数  $\geq 9$ ；单元峰值计数率  $\geq 1\text{Mcps}$ ；X 射线能谱探测器高速电子学读出系统：单通道输出计数率  $\geq 1\text{Mcps}$ ；能量分辨  $180\text{eV}@5.9\text{KeV}$  ( $1\text{kcps}$ )，通道数  $\geq 9$ ；伽马射线能谱探测器能量分辨达到  $1.65\text{keV}@661\text{keV}$  ( $1\text{kcps}$ )；探测能量范围  $0.1\sim1\text{MeV}$ ；单元数  $\geq 3$ 。

关键词：同步辐射，高纯锗探测器，读出电子学，多元阵列

### 5.5 中子源的关键核心技术研究（共性关键技术）

研究内容：针对先进中子源装置中的束流传输关键元件，发展中子超镜导管的自主可控的关键核心技术。

考核指标：突破关键核心技术，研发的关键元件性能国际先进，并能在中子源装置上使用。具体指标为：单元长度  $\geq 2\text{m}$  的中子超镜导管，其  $m$  值  $\geq 3$ ； $m=3$  时，反射率  $R \geq 90\%$ ；中子导管的内表面波纹度小于  $1.5 \times 10^{-4}\text{rad}$ ；中子导管出入口尺寸公差和形位公差优于  $0.02\text{mm}$ 。准直安装精度小于  $50\mu\text{m}$ 。

关键词：先进中子源，束流传输关键元件，超镜导管

## 6. 交叉科学与应用

### 6.1 新型富氢高温超导体的超高压合成和表征先进技术及构效关系研究（基础研究）

研究内容：面向室温超导重大科学问题，针对二元富氢高温超导体超高压合成和微米级样品物性-结构表征困境，依托综合极端条件实验装置和高能同步辐射光源，发展先进的超高压合成与原位电学、量子传感及超快光谱学表征技术，探索多组元富氢高温超导体并获得关键超导参数及抗磁实验证据；发展先进的超高压单晶同步辐射 X 射线衍射及非弹性散射谱学技术，实现对富氢高温超导体晶体结构、电子结构的解析，揭示高温超导机制。

考核指标：合成三种以上多组元 ( $n \geq 3$ ) 富氢高温超导材料，并实现零电阻、抗磁、超导关键参数的测量；发展亚微聚焦斑 ( $\leq 500\text{nm}$ ) 超高压 ( $\geq 200\text{GPa}$ ) 单晶同步辐射 X 射线衍射技术，确定 2 种以上富氢超导材料的晶体结构；发展超高压 ( $\geq 150\text{GPa}$ ) 同步辐射 X 射线拉曼散射和核共振散射等谱学实验方法，解析富氢超导材料的电子结构。

关键词：富氢高温超导体，先进表征技术，高温超导机制

### 6.2 高能离子辐照损伤机理及其在宇航元器件和核能材料中的应用（基础研究）

研究内容：高能离子与物质相互作用是研究辐射环境下系统可靠性的基础问题，依托重离子加速器等大科学装置，开展宽禁带半导体材料损伤及器件失效机理、14nm 及以下工艺器件

和基于神经网络的 AI 芯片等系统集成器件的单粒子效应、先进封装器件和整机的单粒子效应实验技术与评估方法研究。建设基于高能离子束的功能先进的核用材料多场耦合实验研究平台，探索多场耦合条件下核用材料服役性能的快速模拟评价技术与实验方法。

考核指标：建立离子材料损伤和器件性能退化或失效模型，获得系统集成器件的重离子单粒子效应规律；提升单粒子效应实验平台能力，硅中 LET 值范围 0.1~119.4MeV/ (mg/cm<sup>2</sup>)，射程 > 3mm，并建立高能离子单粒子效应实验规范或标准；建立温度、辐照、液态介质与应力等多场耦合评价平台，辐照/腐蚀温度 ≤ 600℃，重离子/质子辐照剂量 ≥ 20dpa，样品最大应力 ≥ 30MPa。

关键词：高能离子，辐照损伤机理，单粒子效应，先进宇航器件，核能材料，多场耦合技术

### 6.3 基于中子源探测的全尺寸舰船钢构件服役性能评价研究（基础研究）

研究内容：面向我国大型舰船钢结构服役安全需求，依托先进中子源装置发展中子成像缺陷智能识别技术及三维残余应力分布解析方法，应用中子穿透能力强的特性，研究全尺寸舰船用钢板、焊接构件残余应力及内部缺陷的特征及分布规律；在此基础上突破全尺寸舰船用焊接试件三轴试验技术，阐明焊接构件多轴疲劳宏—微观尺寸效应；探究残余应力及多向应力共同作用下高强度舰船用钢焊接构件应力腐蚀开裂规律及机制；揭示残余应力



分布规律对全尺寸舰船用钢板断裂与止裂韧性的影响。

考核指标：实现全尺寸舰船用钢板及焊接试件中子探测残余应力测试精度不低于 20MPa、缺陷尺寸分辨率不低于 100 $\mu\text{m}$ ，缺陷自动识别类型不少于 4 种；基于中子源残余应力测试取样体积不小于 400mm $\times$ 400mm $\times$ 40mm（厚度方向），残余应力测量体积不小于 4mm $\times$ 20mm $\times$ 20mm（厚度方向），测量时长不小于 48h。实现厚度不低于 80mm、宽度不低于 500mm 全尺寸舰船用钢板试件残余应力及断裂与止裂韧性测试；全尺寸钢板焊接试件三轴疲劳测试系统载荷能力在三个轴向均不低于 2000kN；全尺寸焊接试件结构形式及焊接工艺组合不少于 4 种。

关键词：舰船钢结构，中子成像，缺陷特征，应力分布

#### **6.4 高速列车车轮多尺度残余应力及服役损伤评价方法（基础研究）**

研究内容：基于先进中子源和同步辐射光源，发展高速列车关键材料直接或原位研究的实验技术，尤其关注工程大尺寸材料及部件试验表征技术；突破关键材料及部件深部多尺度应力场无损表征、缺陷跨尺度表征技术，揭示基于速度效应的疲劳损伤机制，建立时速 400 公里高速列车关键材料及部件的全链条适用性评价标准体系。

考核指标：发展基于中子/同步辐射的大型构件全尺寸及关键部位深部三维残余应力分布无损表征技术，实现不小于 15mm 深部多尺度应力场三维重构；发展典型损伤缺陷的跨尺度表征技术，

实现关键部件及材料裂纹萌生及扩展研究，同步辐射成像空间分辨率优于  $1\mu\text{m}@3\text{mm}$ ；中子成像分辨率优于  $50\mu\text{m}@10\text{mm}$ 。

关键词：大尺寸部件，应力场无损表征，损伤机制，评价标准

## 7. 青年科学家项目

### 7.1 利用 ATLAS 对撞数据寻找电弱能标下的 CP 破缺现象（基础研究）

研究内容：利用大型强子对撞机 LHC 上 ATLAS 实验的 Run-3 质子-质子对撞数据研究电弱能标下的 CP 破缺问题。基于顶夸克参与的希格斯粒子产生过程来测量顶夸克汤川耦合中的 CP 特性，在希格斯粒子到双光子等主要衰变末态中完成测量。利用双玻色子衰变末态中的角分布等动力学特征，重建与 CP 相关的灵敏观测，来研究双玻色子过程中的 CP 性质。利用这些测量结果，并结合已有实验结果，开展统计研究，限制相关理论模型如有效场理论中的 CP 不对称参数。

考核指标：采用希格斯玻色子伴随顶夸克产生模式约束顶夸克汤川耦合中的 CP 混合角，结果比 Run-2 提高 20%，并进一步联合其他涉及顶夸克汤川耦合的物理过程提高精度。测量双玻色子过程中对 CP 破缺现象灵敏的观测，测量不同玻色子极化态对应的有效截面，相较 Run-2 数据分析获得更好精度，或首次在该实验末态完成 CP 相关测量。利用统计分析获得对有效场理论 CP 破缺参数的限制，预期比 Run-2 数据分析提高 20%，新的 CP 测量结果也可潜在探索更高能标的 CP 破坏机制。

关键词：ATLAS 实验，CP 破缺参数测量，CP 破坏机制

## 7.2 正负电子对撞机上的重子物理研究（基础研究）

研究内容：利用 BESIII 上获取的 100 亿事例和 2.0~4.95GeV 非共振态能区的实验数据开展重子的产生和衰变性质研究，为研究重子内部结构提供重要的实验信息，并精确测量超子衰变的 CP 不对称性。主要包括：精确测量正负电子湮没到 SU(3) 重子对的产生截面和电磁形状因子；利用超子—反超子的量子纠缠和干涉特性寻找超子衰变中的 CP 破坏；精确测量超子的稀有衰变，如辐射衰变，半轻衰变等。

考核指标：重子产生性质研究，通过能量扫描和初态辐射方法系统性研究 SU(3) 重子对从阈值到 4.95GeV 的产生截面，提取电磁形状因子和极化率等参数，确定共振态附近重子对过程中强相互作用和电磁相互作用的相位差；寻找超子衰变中的 CP 破坏，在  $10^{-3}$  的实验精度下检验超子的 CP 不对称性，精确测量超子衰变的 Lee-Yang 参数；系统研究超子辐射衰变，首次在正负电子对撞机上的超子稀有衰变测量，并获取领先世界平均值的实验结果。这是 BESIII 实验独有的实验创新之处。

关键词：BESIII 实验，重子产生与衰变，CP 不对称性

## 7.3 强磁场下高温超导缆线失超机制研究（基础研究）

研究内容：瞄准大型超高场磁体用高温超导缆线的失超行为，依托稳态强磁场实验装置，发展超高场大电流精确测量新技术，深入研究高温超导缆线失超发生和传播机制；探索超高稳态磁场、超

大运行电流对最小失超能和失超传播速度等失超过程关键特性的影响机制，研究强磁场下高温超导缆线失超检测的新策略。

考核指标：发展针对大型超高场磁体用高温超导缆线的新型超高场（ $\geq 20\text{T}$ ）大电流（ $\geq 100\text{kA}$ ）精确（ $\leq 100\text{ppm}$ ）测量新技术，开发 1~2 种检测高温超导缆线失超的候选方法；阐明超高稳态磁场、超大运行电流对最小失超能和失超传播速度的影响机制，明确强磁场下高温超导缆线的失超判据；开发出强磁场下高温超导缆线的失超检测系统 1 台，检测到失超时，热点区  $< 1\text{cm}$ 。

关键词：稳态强磁场，高载流缆线，高温超导，失超传播

#### 7.4 超强磁场下多自由度多手段多物性综合测量技术与方法研究（共性关键技术）

研究内容：围绕凝聚态物理和材料科学中对电子自旋、轨道、电荷、核自旋、晶格等多自由度及多维度物性的探测需求，结合超强磁场的独特优势，研发强磁场下核磁共振、交流比热实验装置，拓展强磁场下的压力维度并发展多重极端条件下电输运等多手段物性测量技术，为强关联电子系统中场致物态调控和量子物性起源等重大科学问题的突破提供独特测量方法和测试平台。

考核指标：建设超强磁场核磁共振测试系统，实现 1.5~300K，0~50T 范围内核磁共振频谱测量，化学（奈特）位移测量精度优于 1%；研发超强磁场下的交流比热技术，实现 1.5~300K 温度区间内超强长脉冲磁场（0~50T，100ms）下的交流比热测量，测量灵敏度达到  $10\mu\text{J/K}$  量级；开展强磁场-压力多重极端条件下的电

输运技术研究，测量条件 0~50T，1.5~300K，0~20GPa，电输运测量精度达到 0.01 $\Omega$ 。

关键词：脉冲强磁场 NMR，交流比热，高压，电输运

## 7.5 时域天文观测网络全自动观测与快速后随响应技术研究 (共性关键技术)

研究内容：依托我国大口径、大视场等多台望远镜组成时域天文观测网络，快速捕捉和精细测量伽马暴、引力波、快速射电暴光学对应体、超新星爆发、恒星耀发等短时标暂现源。融合观测设备、环境、图像等多源传感器数据，研究望远镜全自动观测、天文观测环境智能评估、多功能光谱终端全自动观测和多台址多设备一体化调度技术，实现暂现源的早期多波段测光和光谱观测。

考核指标：观测网络包括 3 个以上观测台站、10 台以上望远镜。观测网络极限探测能力优于 22 等（V 波段），最大搜寻视场 > 20 平方度（望远镜口径  $\geq 1$  米），支持 3 种以上不同暂现源的标准化观测，观测网络单元具备队列观测和暂现源观测能力；具备基于观测环境变化的实时曝光计算能力，曝光时间估算偏差优于 10%；多功能光谱终端具备全自动观测功能，获得第一幅光谱图像的响应时间短于 3 分钟。获得伽马暴、引力波、快速射电暴光学对应体、超新星爆发、恒星耀发等短时标暂现源样本数超过 100 个，研究极端条件下的物理规律。

关键词：暂现源后随观测，观测网络，一体化调度，光谱全自动观测，实时曝光计算

## 7.6 先进光源软韧 X 射线能区高帧频面探测器系统（共性关键技术）

研究内容：针对国内外最新一代的先进光源装置，例如衍射极限储存环同步辐射和自由电子激光，对面探测器在高空间分辨率、高帧刷新频率、大动态范围、大探测面板、快时间响应、高量子效率等性能上的需求，研发新一代的、具有自主知识产权的电荷积分型硅像素阵列探测器，实现在软韧 X 射线能区高量子效率传感器芯片、高速片上数字化读出电子学芯片、高密度像素级互连封装技术、海量数据高速传输与处理等方向的突破，为相干衍射成像、串行晶体学、X 射线光子关联谱学、泵浦探测等前沿科学实验提供有效的探测手段。

考核指标：X 射线响应能区 3keV~15keV，优化能量点 6keV；帧刷新频率  $\geq 10\text{kHz}$ ；动态范围从单光子灵敏到  $10^4$  光子/像素/帧@6keV；量子效率  $\geq 80\%$ @3keV；等效噪声电荷  $\leq 200e^-$  (rms)；模数转换（ADC）位数  $\geq 12\text{bits}$ ；像素尺寸  $\leq 150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ ；单模块像素数目不小于 100k。

关键词：软韧 X 射线，高帧频，硅像素阵列探测器，数据高速传输

## 7.7 面向先进同步辐射光源的全流程自动化与智能化实验软件系统（共性关键技术）

研究内容：面向同步辐射高通量、多模态的新实验模式，研究自动化与智能化实验控制软件系统和在线数据快速处理与反馈

软件系统；研究大数据+人工智能在复杂实验控制、计算密集型数据处理结果快速预测、多模态数据匹配融合中的应用；突破高通量数据采集与分发、多模态数据融合、多维度数据组装、并行化在线分析、高性能写盘等关键技术。

考核指标：研制自动化与智能化实验控制与数据采集软件系统 1 套；研制基于大数据+人工智能的在线数据处理软件应用系统 1 套；数据处理的峰值速度达到 1Tb/s，实现人工智能技术在复杂实验控制、计算密集型数据处理结果快速预测、多模态数据特征提取与匹配融合等方面的应用不少于 3 项，并在具有自主知识产权的同步辐射实验控制与数据采集软件框架集成；在国内 2 个以上同步辐射光源且不少于 8 个光束线站部署应用。

关键词：同步辐射软件，全流程，数据采集与分析

### **7.8 面向先进中子源的中子散射科学数据分析软件（共性关键技术）**

研究内容：面向先进中子源多学科应用的科学软件需求，研发先进中子源的科学数据分析软件框架，支持反应堆中子源常波和散裂中子源飞行时间模式的数据分析；研发中子谱仪事例数据处理方法，支持高通量数据实时、时序和离线处理；研发中子谱仪的物理分析算法，实现中子衍射、反射、小角散射、全散射、非弹性散射等多类中子散射数据分析；研发中子谱仪数据可视化交互软件框架，支持网页、云端等多应用场景。

考核指标：不同类型谱仪数据分析方法不少于 5 种，单进程

中子事例处理速率不低于  $10^6$ n/s。

关键词：中子源软件，中子散射，数据分析

### **7.9 光控斯格明子的材料、机制与调控研究（基础研究）**

研究内容：针对量子信息载体多样化、环境友好的发展趋势，基于同步辐射软 X 射线和基于太赫兹自由电子激光，在多物理场条件下高空间分辨、高时间分辨、高能量分辨的量子物性探测技术，研究能够产生光控斯格明子的新型量子功能材料体系；发展光控产生斯格明子新方法，研究其调控动力学行为，揭示光、电场与自旋耦合关联的机制；实现能够适用量子信息载体的斯格明子光控规模化产生。

考核指标：至少发现两种光控产生斯格明子的新材料体系；斯格明子的尺寸  $\leq 10$ nm；光场操控速度达皮秒量级；可控定域化、规模化制备大于 100 个/基片。

关键词：软 X 射线，太赫兹量子物性探测，光控斯格明子

### **7.10 基于高亮度光源纳米相干多模态表征新方法的原位纳米生物效应研究（共性关键技术）**

研究内容：依托高亮度同步辐射光源装置，针对纳米生物效应在微纳尺度上规律和作用机制的研究需求，围绕 X 射线对生物细胞或组织的三维成像衬度低、痕量纳米粒子浓度检测限极低、化学价态难常规技术难以表征等特性，系统发展纳米尺度空间分辨、亚纳秒时间分辨情况下的表面/体相结构、元素分布、化学价态等相干 X 射线测量技术，为生命科学、脑科学、纳米材料学等



研究提供先进的测试平台。

考核指标：实现基于硬 X 射线、电子、激光等多探针同微区原位实验表征能力，其中硬 X 射线最高能量  $\geq 10\text{keV}$ ，聚焦光束  $\leq 30\text{nm}$ ，能够满足大厚度大尺寸生物样品体相结构、元素、化学价态等关键信息的三维表征。基于硬 X 射线相干衍射成像技术实现空间分辨优于  $50\text{nm}$  的三维结构测量；基于纳米飞行扫描技术实现空间分辨优于  $30\text{nm}$  的三维元素分布测量；基于能量扫描相干衍射成像方法实现空间分辨优于  $100\text{nm}$  的化学价态分布测量。实现激光泵浦技术下时间分辨率优于  $1\text{ns}$  的衍散射实验测量；实现空间分辨优于  $20\text{nm}$  的样品表面结构测量；实现温度  $\leq 100\text{K}$  的低温冷冻样品环境。

关键词：纳米生物效应，X 射线测量技术，三维表征

### **7.11 临氢关键材料服役性能评价技术研究（共性关键技术）**

研究内容：针对聚变能和氢能中的临氢关键材料，发展中子原位测量实验技术，建立贮氢材料服役条件下中子原位测量实验装置，实现典型贮氢材料充放氢过程的氢原子占位的原位分析；依托重大工程材料服役安全研究评价设施，评估典型临氢关键材料的长期服役性能，初步构建临氢结构材料服役性能数据库；研究临氢关键材料服役失效机理，建立材料临氢失效预测模型，为聚变能和氢能发展中的安全问题提供借鉴。

考核指标：发展中子原位测量实验技术与装置，实现高于  $70\text{MPa}$  以上高压气氢、深低温液氢等服役环境；性能数据库包括强

度、韧性、疲劳等关键性能，材料种类 $\geq 5$ 种；材料临氢失效预测模型精度 $\geq 85\%$ ；研制1~2种具有优异综合性能的临氢关键材料。

关键词：贮氢材料中子原位测量，临氢材料服役性能评估、预测

### **7.12 稀土功能材料中基础性科学问题的中子散射技术与方法研究（基础研究）**

研究内容：依托大科学装置，针对含有中低吸收截面的 La、Ce、Y、Sc、Pr、Nd 元素及强磁性的 Ho、Er 元素的稀土磁性合金/稀土铁氧体材料体系，建立超晶格磁峰、无公度磁峰及消光再现峰的解析方案，发展中子衍射数据的多谱、多相拟合方法；揭示外场调制下晶格对称性及磁结构的精确演变机制；阐释关键原子对稳定晶格、调制磁性的物理机理，指导高性能稀土磁性材料的设计与制备。

考核指标：发展畸变晶体结构的解析方法，实现畸变晶格结构与磁结构的同步表征，含有消光再现峰的典型材料3种及以上；实现复杂晶体结构/磁结构的多相分散解析新方法，相数4种及以上；建立3种以上稀土磁性合金/铁氧体材料关键性能数据库，构建高性能稀土磁性材料的设计准则。

关键词：稀土磁性合金，稀土铁氧体，外场调制，中子检测

### **7.13 基于超强磁场和低能量中子，新型磁性材料中非平庸量子态的多维度构筑与表征（基础研究）**

研究内容：依托强磁场、散裂中子源、同步光源等实验装置，

针对量子磁性体系中自旋、轨道、晶体场等多自由度耦合，多体纠缠和量子隧穿效应，寻找具有几何阻挫磁性的新材料；利用基于超强磁场、极低温、宽能量和动量范围的中子谱等测量手段，多维度表征与调控系统的自旋涨落、系统量子态的拓扑性质以及量子退火等奇异行为；结合多体理论，判定基态和低能激发态的自旋构型；探索磁性材料在量子计算模拟中的潜在应用。

考核指标：找到 2~3 种新型几何阻挫量子磁性材料；研发极端条件下的热动力学测量技术，实现 0~50T，1.5~300K 的交流比热测量，测量精度优于  $1\mu\text{J}/\text{K}$ ；表征和调控至少 2 种新的非平庸自旋量子态，利用低温低能量中子散射实验等揭示其微观机制。

关键词：自旋阻挫量子材料；非平庸量子态；超强磁场；中子散射；同步辐射 X 光谱学